

REGENEROVATELNÁ SADRO-ANHYDRIDOVÁ ZMES

REGENERATE PLASTER – ANHYDRIDE MIXTURE

M. POKUSOVÁ¹, M. MURGAŠ², E. BELICA³

ABSTRACT: In the paper, the results are presented, which were obtained during development of plaster mixtures determined for molding technology using the lost wax pattern. The mixtures were developed to cast the thin-wall castings of 3 - 7 mm with the large surface. The paper presents the results of experiments with the moulding mixture consisting neither of 20 wt. portions of the water-dissoluble anhydride with 1 wt. portion of plaster, or of only anhydride with water. The results refer that mechanically reclaimed material from used plaster moulds, which were fired at the temperature higher than 450°C, are suitable for using as equivalent raw material to produce the mold mixtures. The high resistance to crack formation on a mould surface characterizes the mixture that gives the good surface quality. The ecological benefit is recycling about 95% portion of the used mould material.

KEY WORDS: moulding mixture, plaster, water-dissoluble anhydride, recycling thin-walled castings

1 ÚVOD

Pri výrobe umeleckých, ale aj priemyselných odliatkov sa veľmi dobre uplatňujú sadrové formovacie zmesi v kombinácii s metódou vytaviteľného voskového modelu. Zaistenie vysokej akosti povrchu veľkoplošných škrupinových odliatkov kladie vysoké technologické nároky na formy, hlavne na odolnosť voči tvorbe povrchových prasklín a celkových deformácií počas vytavovania vosku a tepelného spracovania foriem. Zlé skúsenosti s obvyklými výplňovými zložkami sadrových zmesí akými sú kremičitý piesok, šamot, antuka a pod. viedli k úvahám o ich náhrade materiálom z použitých foriem po vhodnej mechanickej úprave. Technológia vytaviteľného vosku vyžaduje vypaľovanie foriem pri teplote nad 400°C, kedy z bezvodého CaSO_4 vzniká vo vode nerozpustný anhydrid II (β - CaSO_4). Pri vývoji zmesí sa postupne zvyšoval podiel anhydridu až na úroveň úplnej regenerovateľnosti sadrových zmesí z foriem po odliatí. Laboratórne ako aj praktické skúšky ukázali, že aj samotný regenerovaný anhydrid môže slúžiť ako plnohodnotná surovina na výrobu foriem a jadier.

2 VÝVOJ SADROVÝCH ZMESÍ

Vlastnému praktickému využívaniu sadrových zmesí predchádzal rozsiahly výskumný program, ktorého cieľom bolo komplexne navrhnuť taký postup výroby formy, ktorý by zaistil jej dobré výsledné technologické vlastnosti a hlavne reprodukovateľnosť výsledkov. Napriek zdanlivo jednoduchému princípu spevňovania zmesí hydrataciou a aplikácii iba mierne modifikovaných, z literatúry známych [1], osvedčených postupov ako metódy Antioch, Bendix a napenených zmesí,

¹ Doc. Ing. Marcela Pokusová, CSc. – Ministerstvo životného prostredia SR, nám. L. Štúra 1, 812 35 Bratislava

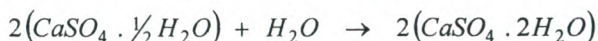
² Prof. Ing. Marián Murgaš, CSc. – Materiálovotechnologická fakulta STU, Paulínska 16, 917 24 Trnava

³ Ing. Eugen Belica – Materiálovotechnologická fakulta STU, Paulínska 16, 917 24 Trnava

mnohé počiatočné neúspechy poukázali na potrebu vlastného vývoja zmesi. Skúsenosti tiež naznačili, že s ohľadom na technologicky odlišné podmienky na lícnych plochách, vo vnútorných priestoroch formy a v jadrách môže byť použitie „jednotnej zmesi“ problematické. Ďalšie práce boli potom zamerané do troch smerov - na vývoj jadrových, výplňových a lícnych reliéfnych zmesí. Pritom bolo potrebné vyriešiť otázky zaistenia manipulačnej pevnosti, presnosti a rozmerov formy po tepelnom spracovaní, dostatočnej priedušnosti zmesi a minimalizovania vývinu plynov pri liatí. Aby mali odliatky hladký povrch, museli zmesi samozrejme zaistiť aj odolnosť foriem s plochou často až okolo 1 m² voči celkovým tvarovým deformáciám a tvorbe povrchových prasklín počas vytavovania vosku, tepelného spracovania formy a počas odlievania.

Vlastnosti zmesi závisia predovšetkým od typu použitej sadry. Sadra sa vyrába zo sadrovca alebo produktu odsírovacích zariadení $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ žiňaním, pri ktorom sa odstráni viazaná voda. Pri žiňaní pri teplote nad 97°C v atmosfére nasýtenej vodnej pary sa získava α -hemihydrát $\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ a pri teplote pod 100°C v suchej atmosfére vzniká β -hemihydrát $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, ktorý reaguje s vodou aktívnejšie než α -hemihydrát. Sušením α -hemihydrátu pri teplote okolo 100°C sa po odstránení viazanej vody vytvorí α -anhydrid CaSO_4 . Žiňaním dihydrátu pri teplote nad 300°C v suchej atmosfére sa získava bezvodý β -anhydrid. Po žiňaní, akejkolvek modifikácie síranu vápenatého pri teplote nad 350°C je produktom vo vode nerozpustný anhydrid CaSO_4 (anhydrid II), známy aj pod pojmom pálená sadra.

Jednoduché komerčné typy sadry sa odlišujú rýchlosťou tuhnutia, tvrdosťou, pevnosťou spoja medzi vrstvami postupne nanášanými na už stuhnutú podkladovú vrstvu a náchylnosťou na tvorbu povrchových prasklín. Veľká odlišnosť vlastností je spôsobená rôznym zastúpením hemihydrátov (tvoria väčšinu) a anhydridov, čo závisí od postupu výroby a použitých vstupných surovín. Tuhnutie sadrových zmesí je založené na hydratácii zmesi hemihydrátov a malým množstvom anhydridov, pri ktorej vznikne pevný dihydrát síranu vápenatého podľa rovnice:



Rýchlosť tuhnutia sadry závisí najmä od obsahu β -hemihydrátu, ktorý reaguje s vodou intenzívnejšie než ostatné zložky a zvyšovanie jeho podielu výrazne skracuje dobu tuhnutia. Na rýchlosť tuhnutia vplyvajú aj ďalšie faktory ako množstvo a teplota vody, ale aj prítomnosť sprievodných solí, ktoré sa nachádzajú v komerčných sadrách alebo zámerne pridávaných do zmesi s cieľom úpravy doby tuhnutia. Vytvorený dihydrát môže tvoriť formu samotný alebo súčasne ako nosná zložka a spojivový systém vhodnej výplňovej zložky.

Sadra po stuhnutí je tvorená dihydrátom síranu vápenatého, ktorý obsahuje okolo 21% chemicky viazanej vody a v poroch samotnej formovacej zmesi sa nachádza aj voľná voda, pretože zmesi sa vždy pripravujú s určitým prebytkom vody. Pri odlievaní akejkolvek zliatiny s teplotou liatia vyššou než 100°C do surových foriem by došlo ku uvoľneniu vody a preto je potrebné vždy formy tepelne spracovať. Ku najintenzívnejšiemu uvoľňovaniu vody vo forme pár dochádza v intervale teplôt 100 až 200°C, kedy sa v zmesi zmení dihydrát na hemihydrát, pričom sa odstráni viac než 2/3 z celkového obsahu viazanej vody a časti i voľnej vody. Pri teplote nad 300°C sa uvoľní zostávajúca viazaná voda (teoreticky 6,2%) z hemihydrátu a vznikne vo vode rozpustný anhydrid III - bezvodý CaSO_4 . Pri teplote vyššej než 450°C z rozpustného anhydridu III vznikne anhydrid II, ktorý je vo vode nerozpustný. Pri teplotách nad 450°C sa z formy odstráni aj zvyšky voľnej vody a pri liatí farebných kovov na bázu Al alebo Cu dochádza ku zanedbateľnému vývinu plynov. Takéto formy sú iba veľmi málo hydrofilné a môžu sa skladovať aj niekoľko týždňov bez negatívnych dôsledkov na kvalitu povrchu odliatkov. Vypaľovanie bežných foriem pri teplote vyššej než 450°C už významnejšie neovplyvní kvalitu povrchu odliatkov a vývin plynov pri liatí. Pri tepelnom spracovaní foriem a jadier hrubších než 10 cm po výdrži na 450°C často volíme ešte doplnkové žiňanie pri teplote okolo 600°C, aby sa z ich stredových oblastí bezpečne odstránili posledné zvyšky vody a najmä vosku.

Nevyhnutná priedušnosť foriem sa zaisťuje buď v napenených zmesiach vytvorením veľkého množstva navzájom prepojených bubliniek alebo vhodnou výplňovou zložkou, ktorá navyše znižuje spotrebu sadry bez zhoršenia mechanických vlastností formy. Napenené zmesi sa pre svoju vysokú

priedušnosť a nízku tepelnú vodivosť veľmi dobre uplatňujú pri odlievaní malých tenkostenných odliatkov, ale pri odlievaní veľkoplošných odliatkov, obvyklých v umeleckom zlievarenstve, už ich použitie prináša mnohé ťažkosti. Pevnosť napenených zmesí sa pohybuje v rozmedzí od 100 do 250 kPa a zaistenie rozmerovej presnosti u plošných odliatkov s hrúbkou steny 3 až 7 mm, ktorých plocha prevyšuje 0,5 m² už vyžaduje náročné armovanie foriem. Dôsledkom malej pevnosti a známej nízkej odolnosti voči oteru vznikajú ďalšie vážne problémy pri akejkolvek manipulácii s ťažkými formami.

Pre veľkoplošné odlátky sa ukázalo najvýhodnejšie použitie sadrových zmesí s približne tretinovým podielom výplňovej zložky. Hlavným kritériom pri výbere typu plnidla do zmesi bolo zaistenie dobrých technologických vlastností formy, a ďalšími kritériami boli cena suroviny, dostupnosť na trhu a trvalá stabilita technologických vlastností. V praxi často používané sadrové zmesi s výplňovým kremičitým pieskom možno pokladať za nevhodné pre umelecké zlievarenstvo. Vyznačujú sa nižšou priedušnosťou a vyššou náchylnosťou ku tvorbe prasklín, než zmesi s prídavkom šamotu alebo antuky. Dobré a prakticky rovnocenné výsledky z hľadiska priedušnosti, tvorby povrchových trhlín, vývinu plynov a celkovej kvality povrchu odliatku sa dosiahli pri použití šamotu alebo antuky v množstve 2 hm. diely plnidla na 3 hm. diely sadry. Použitie jemnejších frakcií na reliéfnu zmes zaisťuje nižšiu drsnosť povrchu a vyšší podiel väčších frakcií v jadrových zmesiach zasa ich žiadúcu vyššiu priedušnosť. Oba typy zmesí sa použili napr. pri odlievaní väčšiny dielov sochy gen. M. R. Štefánika s výškou 2,6 m a hmotnosťou cca 700 kg [2]. Podľa našich skúseností sa použitie antuky a šamotu pri veľmi vysokých nárokoch na akosť povrchu veľkých odliatkov ukázalo ako neuspokojivé pre nevhodné technologické vlastnosti zmesi zavinené obsahom zložiek spôsobujúcich penetráciu taveniny do formy alebo nevhodnou granulometriou. Najlepšie výsledky z hľadiska kvality povrchu odliatkov, rozmerovej presnosti, vývinu plynov pri liatí, tvorby trhlín a manipulačných vlastností formy sa dosiahli u zmesi, u ktorej bola plnidlom drvina vo vode nerozpustného anhydridu $CaSO_4$ z použitých foriem. Po prvých sľubných výsledkoch sa v zmesiach postupne zvyšovalo zastúpenie drviny až do stavu, kedy maltovina bola vytvorená prevažne zo samotného pomletého anhydridu. Orientácia na anhydrid ako výplňovú zložku nebola náhodná. Bola výsledkom iných paralelných prác, pri ktorých sa prvotne sledovali možnosti recyklácie materiálu použitých foriem.

V umeleckom zlievarenstve je zvlášť dôležité, aby pri odlievaní dochádzalo na funkčnom povrchu formy ku minimálnemu vývinu plynov a vodných pár. Takéto vlastnosti podľa mnohoročných skúseností zaisťí iba forma vyžíhaná pri teplote aspoň 450°C, kedy je tvorená prakticky iba vo vode nerozpustným anhydridom. Zvyšky formy a jadier odstránené z odliatku potom predstavujú vhodnú surovinu na výrobu plnidla. Laboratórne skúšky ukázali, že plnohodnotnú výplňovú zložku je možné pripraviť rozdrvením úlomkov použitých foriem v kolesovom mlyne do stavu, kedy rozmery najväčších fragmentov nepresahujú 4 mm. Vtedy je už v drvine dostatočný podiel jemných frakcií. Po odstránení nežiadúcich frakcií na site s okami 2 x 2 mm sa získa drvina s výhodnou granulometriou, ktorá minimálne ovplyvňuje tekutosť namiešanej zmesi a zaisťuje veľmi dobré mechanické a technologické vlastnosti foriem po tepelnom spracovaní. Pri veľmi vysokých požiadavkách na vernosť kopírovania jemných reliéfov je vhodné použiť drvinu s granulometriou pod 1 mm. Materiál z použitých foriem autori spočiatku pokladali za vhodný iba na výplňovú zložku zmesí, v ktorých pevnosť musí zaisťiť prídavok malého množstva sadry. Hlavným argumentom bol poznatok, že drvina ani po viac než 3 rokoch skladovania v papierových vreciach nejavila tendenciu tvrdnúť alebo aspoň tvoriť povrchovú kôru. V súčasnosti sa na pracovisku autorov využíva zmes s prevažným zastúpením drviny z použitých foriem s malým prídavkom bežnej modelárskej sadry na pokrytie strát pri regenerácii.

3 EXPERIMENTÁLNE PRÁCE

Na prípravu základnej zložky zmesi, ktorou je anhydrid sa použil S-miesič, kde boli pomleté úlomky použitých sadrových foriem. Po zomletí bola drvina preosiata cez sito s rozmermi oka 1 x 1 mm, čím boli určené rozmery najväčšej frakcie pri dostatočnom množstve prachových častí. Nadsitové frakcie sa vracali naspäť do mlyna na ďalšie spracovanie až do úplného pomletia celej dávky. Z takto pripraveného anhydridu a sadry sa namiešala východisková zmes so smerným

zložením 20 hm. dielov drviny anhydridu s 1 hm. dielom sadry (zmes 20:1) a vody, z ktorej boli vyrobené skúšobné telieska pre skúšky vybraných mechanických vlastností experimentálnych zmesí. Pri vývoji anhydrido-sadrových zmesí autori pripisovali rozhodujúci význam zisťovaniu závislosti tvrdosti od doby tuhnutia. Dôvodmi boli vysoká transparentnosť výsledkov, možnosť vysokého počtu meraní na jednej vzorke a uspokojivo presná informácia o povrchovej pevnosti v tlaku. Skúške sa podrobil komplex zmesi 20:1 s odstupňovanými obsahom vody daný hodnotami vodného súčiniteľa $w = 0,6$, $w = 0,7$ a $w = 0,8$. Aby sa zistila úloha anhydridu a prídavku sadry pri tvorbe spojivového systému v zmesiach 20:1, časový priebeh tvrdosti sa zisťoval na dvoch referenčných zmesiach. V prvej bola úplne vylúčená sadra a zmes bola tvorená iba samotným anhydridom. V druhej bol anhydrid nahradený kremičitým pieskom. Maltovina bola teda tvorená 20 hm. dielmi kremičitého piesku a 1 hm. dielom sadry.

Na zisťovanie tvrdosti boli pripravené skúšobné telieska v tvare dosky s rozmermi 143 x 88 x 19 mm, ktoré zaistili podstatne intenzívnejšie vysušovanie než valčeky $\varnothing 50$ x 50 mm. Pre samotné vytvrdzovanie boli zvolené dve prostredia lišiac sa teplotou 18°C a 26°C. Na meranie tvrdosti bol použitý tvrdomer typu HUF1 (AUK-Budapest), kde kritériom tvrdosti bola hĺbka vpichu tlačného telieska s polguľovým zakončením $r = 2,5$ mm a zdvihom 3 mm, ktorý bol na stupnici rozdelený na 100 dielikov. U daného tvrdomeru sa prítlačná sila menila od 1 N pri minimálnej tvrdosti až po 1,5 N v okolí hornej hranice hodnôt tvrdosti (100 j.t.). Pri meraní tvrdosti z plochy vtlačku a pôsobiacej sily môžeme určiť orientačnú hodnotu pevnosti formovacej zmesi v tlaku. Napr. pri tvrdosti 95 j.t. guľové ukončenie vnikne 0,15 mm pod povrch a vytlačený guľový vrchlík $\varnothing 1,7$ mm má prierez 2,28 mm², v ktorom pôsobí stredná hodnota tlaku 0,68 MPa. Hodnota tvrdosti 96 j.t. zodpovedá pevnosti v tlaku približne 0,8 MPa, ktorú môžeme pre väčšinu aplikácií pokladať z hľadiska manipulačných vlastností formy za dostatočnú.

Z ďalších možných skúšok mechanických vlastností sme zvolili zisťovanie strihovej pevnosti, ktorá najlepšie vystihuje vhodnosť použitia zmesi u typicky rozložitých foriem umeleckých odliatkov kmanipulácii. Z hľadiska výroby foriem má najväčší význam zistenie manipulačnej pevnosti, ktorú forma dosiahne po 24 hodinách po zaformovaní. Ako už bolo uvedené vlastnosti formovacích zmesí s vysokým podielom anhydridu sú dosiaľ úplne neznáme a preto experimentálne práce predpokladali realizáciu mechanických skúšok po uplynutí 24 a 96 hodín. Ako ukázali výsledky skúšok strihovej pevnosti po 24 hodinách, zmesi s prídavkom štukatárskej sadry už vykazovali uspokojivé manipulačné vlastnosti, ale zmes tvorená iba vodou a samotným anhydridom bola mierne pod zvolenou hranicou manipulačnej pevnosti, preto bola zvolená ešte doplnková skúška vlastností tejto zmesi po 48 hodinách. Aby sa získala informácia o manipulačných vlastnostiach čisto anhydridových zmesí po 48 hodinách, bola pripravená ďalšia séria skúšobných vzoriek s vodným súčiniteľom $w = 0,6$; $0,7$; $0,8$. Strihová pevnosť sa zisťovala na telieskach $\varnothing 50$ x 50 mm.

Na obr. 1 sú graficky znázornené závislosti tvrdosti povrchu vzoriek od času pre skúšané zmesi 20:1 s vodným súčiniteľom $w = 0,6 - 0,7 - 0,8$ a pre zmes tvorenú iba anhydridom s vodným súčiniteľom $w = 0,7$. Priebeh vytvrdzovania sa zisťoval pri dvoch teplotách pri 18°C v hale zlievarne a pri 26°C v podstatne suchšom prostredí laboratória. Uvedené hodnoty tvrdosti sú vždy aritmetickým priemerom zo 6 meraní. Zo znázornených grafov závislosti tvrdosti od času vidieť, že proces vytvrdzovania prebiehal rýchlejšie pri teplote 26°C, pričom pri oboch teplotách mal priebeh tuhnutia všetkých 4 zmesí veľmi podobné znaky. Po veľmi rýchlom raste tvrdosti počas prvých 3 hodín tuhnutia nasleduje v časovom intervale od 3 do približne 10 hodín etapa podstatne pomalšieho tuhnutia, v niektorých prípadoch sprevádzaná až lokálnym poklesom tvrdosti. Pre následný časový interval vytvrdzovania je charakteristické pomerne pomalé takmer lineárne stúpanie tvrdosti, ktorá u všetkých testovaných zmesí vrátane čisto anhydridovej po 24 hodinách presiahla hodnotu 96 j.t.. Hodnota tvrdosti 96 j.t. zodpovedá približne pevnosti formovacej zmesi v tlaku 0,8 MPa, ktorá sa všeobecne pokladá za postačujúcu pre použitie na bezrámové formovanie. Na základe získaných výsledkov meraní možno konštatovať, že vodný súčiniteľ má významný vplyv na priebeh tuhnutia. Čím je hodnota w vyššia, tým zmesi tuhnú pomalšie.

Na obr. 1 je znázornený aj priebeh tvrdosti v závislosti od času u zmesí tvorených čistým anhydridom pri vodnom súčiniteli $w = 0,7$. Proces tuhnutia prebiehal pri dvoch teplotách, 18 a 26°C, a ako je zrejme z obrázku zvýšená teplota mierne urýchľuje proces tuhnutia. Zmesi tiež vytvrdli pri

zhruba rovnakých časoch. Po 24 hodinách dosiahli tvrdosť prevyšujúcu 97 j.t. a asi po 48 hodinách maximálnu tvrdosť prevyšujúcu 99 j.t., ktorá zodpovedá pevnosti v tlaku nad 3 MPa. Na základe uvedených výsledkov možno konštatovať, že aj samotný anhydrid z použitých vypálených foriem sa môže aktívne podieľať na tvorbe spojivového systému a je vhodným materiálom pre ďalšie použitie na výrobu nových foriem.

Potvrdili to aj skúšky zmesi bez anhydridu, ktoré pozostávali z 20 hm. dielov kremičitého piesku, 1 hm. dielu sadry a odstupňovaného množstva vody. Tvrdosť sa merala tiež na telieskach 143 x 88 x 19 mm, ale už prvé výsledky ukázali, že dosahované hodnoty tvrdosti budú príliš nízke a preto sa pripravili zmesi s vodným súčiniteľom $w = 0,3$, $w = 0,34$ a $w = 0,4$, ktoré boli príliš husté a výroba teliesok vyžadovala tlak na zmes. Časová závislosť tvrdosti testovaných zmesí bez anhydridu je zachytená na obr. 2, z ktorého vidieť, že dostatočne tekutá zmes s $w = 0,8$ dosiahla pevnosť typickú skôr pre bentonitové zmesi po formovaní na surovo a zníženie obsahu vody umožnilo zvýšenie tvrdosti iba na 92 až 93 j.t., čím sa jednoznačne potvrdila aktívna úloha anhydridu na tvorbe spojivového systému.

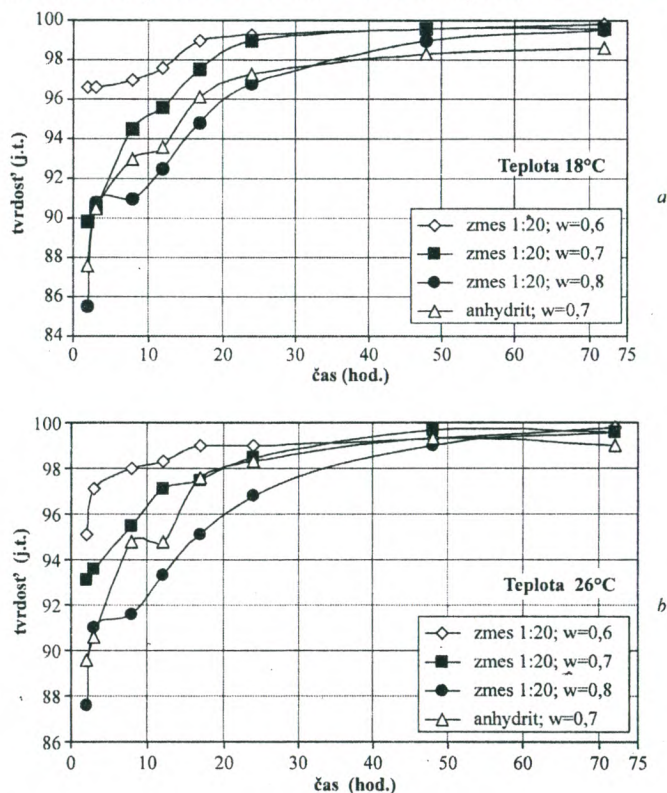
Pri pohľade na závislosti tvrdosti od času na obr. 1 vidieť, že väčšie množstvo voľnej vody danej hodnotou w negatívne vplýva na tvrdosť v priebehu tuhnutia, ale podstatne menší vplyv má na konečnú tvrdosť viac vysušených vzoriek. Zreteľné spomalenie stúpania tvrdosti medzi približne 3. až 12. hodinou naznačuje, že v tomto období mohlo dôjsť ku retardácii procesu hydratácie po vzniku prvého dihydrátu alebo počas postupného prechodu pomerne stabilného rombického anhydridu II na metastabilný hexagonálny anhydrid III, ktorý potom už hydratuje podstatne rýchlejšie.

Iné možné vysvetlenie spomalenia tuhnutia je možné pripísať zmenám rozpustnosti zložiek zmesi a množstva vody v procese. Je známe, že dihydrát rastie z roztoku hemihydrátu alebo anhydridu vo vode a po spotrebovaní väčšieho podielu voľnej vody na hydratáciu a výrazné zníženie koncentrácie roztoku spoločne s retardačným pôsobením vytvoreného dihydrátu sa musí zákonite prejavíť spomalením tuhnutia. Časová interval tuhnutia 3 až 12 hodín, pri ktorom dochádzalo ku zlomu charakteristiky bol prakticky rovnaký pri oboch teplotách čo naznačuje, že rozdielna teplota nevedla ku pozorovateľným zmenám kinetiky tuhnutia. Skutočnosť, že všetky testované zmesi tuhnúce pri vyššej teplote (26°C) mali po rovnakej dobe vytvrdzovania vždy vyššiu tvrdosť než zmesi tuhnúce pri 18°C sa potom môže vysvetliť odparením väčšieho množstva vody z pomerne tenkých, 19 mm hrubých vzoriek. Z obr. 1 vidieť, že najvyššiu hodnotu tvrdosti nad 98 j.t. zodpovedajúcu pevnosti zmesi v tlaku 1,6 MPa dosiahli zmesi 20:1 s $w 0,6$ a $w 0,7$ tuhnúce pri teplote 18°C a zmes 20:1 s $w 0,8$ tuhnúca pri teplote 26°C po 24 hodinách, kedy tvrdosť anhydridovej zmesi s $w 0,7$ pri oboch teplotách iba mierne prekročila dolnú hranicu požadovanej tvrdosti 96 j.t. Prítom tvrdosť anhydridu s $w 0,7$ bola vyššia než zmesi 20:1 s $w 0,8$ najmä počas prvých 24 hodín tuhnutia pri oboch testovacích teplotách.

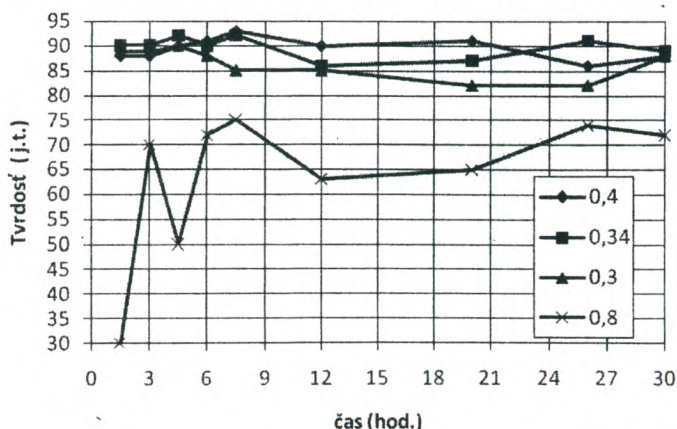
Vo formách pre typické škrupinové odliatky s jadrami sa predpokladá použitie viacero zmesí s rôznymi hodnotami vodného súčiniteľa a preto je vhodné manipulovať s formou až po 24 hodinách tuhnutia a voľného vysušovania foriem na vzduchu, kedy všetky zmesi vrátane anhydridovej s $w 0,7$ už dosahujú manipulačnú tvrdosť prevyšujúcu 96 j.t. Pre získanie informácie o mechanických vlastnostiach materiálu formy a posúdenie jej vhodnosti ku manipulácii sa zvolila štandardná skúška pevnosti v strihu zisťovaná na telieskach $\varnothing 50 \times 50$ mm vyrobených v plastových delených formách. Ku skúškam sa zvolili zmesi 20:1 s vodným súčiniteľom $w 0,6$; $w 0,7$ a $w 0,8$ a čisto anhydridová s $w 0,7$ vytvrdzované pri teplotách 18 a 26°C po dobu 24 a 96 hodín. Skúška strihovej pevnosti po 96 hodinách mala za cieľ overenie dôsledkov podstatne dlhšej doby sušenia vzoriek.

Na obr. 3 je znázornená závislosť pevnosti v strihu skúšanej zmesi 20:1 od množstva vody danej vodným súčiniteľom $w = 0,6$; $0,7$; $0,8$ a čistého anhydridu s vodným súčiniteľom $w = 0,7$, tuhúcich pri dvoch teplotách 18 a 26°C s dobou tuhnutia 24 a 96 hodín. Zo súboru hodnôt strihovej pevnosti zachytených na obr. 3 vyplýva, že pevnosť v strihu stúpa s časom, zmesi tuhnúce pri vyššej teplote maximum dosahujú rýchlejšie a so stúpaním obsahu vody daného hodnotou w sa znižujú dosiahnuté hodnoty strihovej pevnosti. Zvolený časový interval od 24 do 96 hodín bol dostatočne široký na zachytenie závislosti pevnosti v strihu od času. Prekvapením bolo zistenie, že zmes 20:1 a čisto anhydridová zmes s vodným súčiniteľom $0,7$ dosiahli po 96 hodinách vytvrdzovania prakticky rovnakú pevnosť v strihu. Nižšia pevnosť anhydridovej zmesi po 24 hodinách sa dá vysvetliť

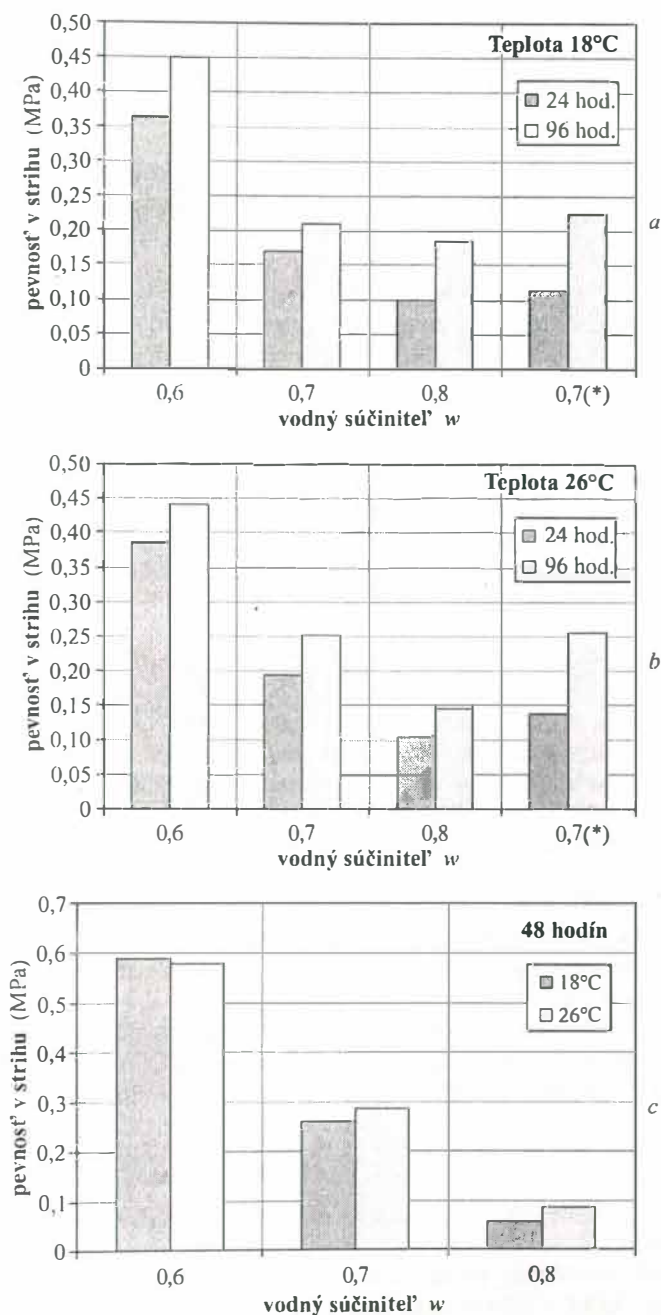
pomalším tuhnutím anhydridu. Vzhľadom na dobré technologické vlastnosti sa skúšky strihovej pevnosti doplnkovo podrobili telieska zo zmesi samotného anhydridu s w 0,6 - 0,7 - 0,8, ktorá sa robila s ohľadom na očakávané pomalšie vytvrdzovanie až po 48 hodinách pri teplotách 18 a 26°C. Skúšky teliesok vyrobených z anhydridu s w 0,6 - 0,7 - 0,8 zisťované po 48 hod. vytvrdzovania (obr. 2c) potvrdili, že použitie zmesi s w 0,8 je pre nízku pevnosť problematické. Hodnoty strihovej pevnosti zmesi anhydridu s w 0,6 a 0,7 boli celkovo vyššie než dosiahli zmesi 20:1 s rovnakým množstvom vody (w 0,6 a 0,7) po dvojnásobnej dobe vytvrdzovania 96 hodín. Výsledky meraní potvrdili v súlade s meraniami tvrdosti (obr. 1), že vzorky tvorené samotným anhydridom s w 0,7 vždy vykazovali vyššiu strihovú pevnosť než zmes 20:1 s vodným súčiniteľom w 0,8.



Obr. 1 Závislosť povrchovej tvrdosti zmesí od času pri teplote 18°C (a) a 26°C (b)



Obr. 2 Závislosť tvrdosti od času zmesi zlozenej z 20 hm. dielov kremičitého piesku a 1 hm. dielu sadry s vodnými súčiniteľmi $w = 0,3 - 0,34 - 0,4 - 0,8$



Obr. 3 Pevnosť v strihu zisťovaná pri 18 and 26°C zmesi 20:1 s vodným súčiniteľom w 0,6 – 0,7 – 0,8, anhydridu s w 0,7(*) po 24 (a) a 96 (b) hodinách, a anhydridu s w 0,6 – 0,7 – 0,8 po 48 (c) hodinách

Zmes 20:1, teda s obsahom cca 4,76% novej sadry má veľmi dobré technologické vlastnosti pri príprave zmesi a výrobe foriem. Drvina anhydridu je veľmi dobre zmáčavá vodou a preto je zmes podstatne menej náročná na spôsob a dobu miešania ako zmesi s antukou alebo šamotom, a začína tuhnúť približne po 15 až 20 minútach. Nie je náchylná na tvorbu bublín a veľmi dobre kopíruje

povrch voskových modelov i bez použitia zmáčadiel alebo tenzidov. Typický spôsob výroby formy spočíva v postupnom zalievaní riedkou kašovitou zmesou súčasne oboch strán voskovej škrupiny a preto nekladie žiadne osobitné požiadavky na rýchlosť tuhnutia sadry. Do zmesi na výrobu jadier sa na armovanie môže pridať cca 0,5 % sklenených vlákien. Na armovanie veľkých foriem je vhodnejšie použiť oceľové pletivo o hrúbke drôtu 0,5 mm. Rýchlejšie tuhnúce druhy sadry, ako napr. alabastrová, sa vyznačujú vyššou tvrdosťou po stuhnutí a nízkou pevnosťou spoja medzi podkladovou vrstvou a po jej stuhnutí nanesenou ďalšou vrstvou zmesi. Prídavok drviny anhydridu v zmesi pevnosť spoja medzi vrstvami subjektívne zvyšuje a preto je možné použiť ľubovoľný komerčný druh sadry.

Pri doterajšom praktickom využívaní anhydridovej zmesi sa ukázali, že majú dobré technologické vlastnosti a pri tepelnom spracovaní i veľmi veľkých foriem nedochádza ku ich pozorovateľným makrodeformáciám. Formy sa vyznačujú mimoriadnou odolnosťou voči tvorbe povrchových prasklín aj pri väčších rýchlostiach ohrevu, čo sa dá vysvetliť poddajnosťou mierne poréznej, dostatočne priedušnej zmesi, ako aj veľmi malými rozdielmi rozťažnosti jednotlivých zložiek zmesi, výplňového anhydridu a postupne sa tvoriacich produktov dehydratácie východiskového dihydrátu. Pevnosť po vypálení vždy presahuje 5 MPa a formy sú dostatočne odolné voči vydrobovaniu povrchu pri manipulácii. Priedušnosť sa pohybuje okolo 20 n.j.p. a pri liatí dochádza ku zanedbateľnému vývinu plynov. Reprodukateľne sa dosahuje vysoká kvalita povrchu odliatkov, vyššia než poskytujú zmesi so šamotovým plnidlom.

5 ZÁVER

Prezentované výsledky skúšok zmesi 20 dielov anhydridu s 1 dielom hemihydrátovej sadry a samotného anhydridu s vodou poukázali na vhodnosť použitia mechanicky regenerovaného materiálu sadrových foriem vypálených pri teplote nad 400°C po odliatí ako plnohodnotnej suroviny na výrobu formovacích zmesí. Zmesi boli vyvíjané hlavne pre umelecké zlievarenstvo, kde podstatne dlhšia doba tuhnutia, charakteristická pre anhydridové sadry, nie je na závalu, ale naopak je určitou prednosťou. Pri výrobe foriem pomocou vytaviteľných voskových modelov sú technologické časy na sušenie, vypaľovanie a chladnutie foriem veľmi vysoké, typicky niekoľko dní a dlhšia doba vytvrdzovania anhydridovo-sadrových zmesí nemusí byť prekážkou ani pri ich priemyselnom využívaní. Získaný anhydrid môže slúžiť aj ako jediná zložka zmesi, ale s limitovaným obsahom vody, ktorý by nemal prekročiť 0,7 litra na 1 kg suchého substrátu. Podľa viacročných praktických skúseností používanie anhydridu prinieslo výrazné zvýšenie akosti povrchu odliatkov, najmä veľkoplošných a škrupinových. Je aj ekonomicky opodstatnené, lebo zaisťuje s minimálnymi nákladmi prakticky úplnú regenerovateľnosť materiálu foriem po odliatí.

6 LITERATÚRA

- [1] Rusín, K. a kol.: *Slévárenské formovací materiály*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1991, 392 s.
- [2] Tóth, R. - Zátura, M. - Vozár, P.: Sadrovo-šamotové formovacie zmesi v umeleckom odlievaní. In: CO MAT TECH 99. Bratislava: STU, 1999, s. 525-528